اثر منیزیم‌اکسید در به‌سازی یک خاک رسی آلوده به فنانترن*

محدثه امینی(۱)	علی رئیسی استبرق(۲)	جمال عبدالهی علی‌بیک(۳)

چکیده *در این پژوهش، اثر مادهٔ افزودنی منیزیم‌اکسید (MgO) برای به‌سازی یک خاک رسی معمولی و نیز خاک آلوده شده به مادهٔ آلی فنانترن با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی گوناگون (شامل حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)) مورد مطالعه قرار گرفت. خاک آلوده به فنانترن به‌صورت مصنوعی در آزمایشگاه تهیه گردید. درصدهای وزنی منیزیم‌اکسید مورد استفاده برای به‌سازی خاک معمولی و خاک آلوده معادل ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ می‌باشند. نتایج نشان داد که افزودن فنانترن به خاک سبب تغییر ساختار خاک و کاهش درصد رطوبت بهینه (w_{opt})، حدود اتربرگ، مقاومت تک‌محوری و ضریب کشسانی مربوط به ۵۰٪ از مقاومت نهایی (E_{50}) خاک می‌شود. هم‌چنین نتایج مشخص کرد که با افزودن منیزیم‌اکسید به خاک طبیعی و خاک آلوده، مقاومت و E_{50} افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که این افزایش تابعی از درصد مادهٔ افزودنی و زمان عمل‌آوری می‌باشد. علاوه‌بر این براساس نتایج SEM مشخص گردید که محصولات کربناسیون تولیدشده در نمونه‌های به‌سازی‌شده سبب افزایش مقاومت می‌گردند.*

واژه‌های کلیدی فنانترن، منیزیم‌اکسید، مقاومت، SEM.

Improvement the Behaviors of a Clay Soil Contaminated with Phenanthrene by Using MgO

M. Amini	A. Raeesi Estabragh	J. Abdollahi Ali Beik

Abstract *In this work, the effect of MgO on the treatment of a natural and contaminated clay soil with phenanthrene was studied through conducting various experimental tests including Atterberg limits, standard compaction, uniaxial compressive strength (UCS), and SEM tests. The contaminated soil was prepared artificially in the lab. Natural and contaminated soil were mixed with 5, 10, 20, and 30% of MgO as an agent. The results showed that phenanthrene changes the structure of the soil and causes a reduction in Atterberg limits, w_{opt}, UCS, and E_{50} of the soil. The results also indicated that the UCS and E_{50} of mixture natural and contaminated soil with different percentages of MgO are increased and the amount of increasing of them is dependent on the percentage of MgO and curing time. SEM results also showed that the formation of carbonation products due to hydration of MgO is effective in increasing the strength of treated soil samples.*

Keywords: MgO, Phenanthrene, UCS, SEM.

*تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۵/۱۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۹/۲۸ از صفحه ۵۳ تا ٦٦ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکدهٔ مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.

Email: amini.mohadeseh@ut.ac.ir

(۲) استاد، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکدهٔ مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.

(۳) مربی، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکدهٔ مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.

مقدمه

آلودگی خاک به ترکیبات نفتی، یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی می‌باشد که افزایش جمعیت و نرخ بالای فعالیت‌های صنعتی سبب تشدید این مشکل شده‌است. این نوع از آلودگی به‌خصوص در اطراف تأسیسات اکتشاف، پالایش، محل ذخیره و در مسیر انتقال این مواد به‌صورت گسترده وجود دارد. آلودگی خاک مختص محل و محدودهٔ خاصی از خاک آلوده‌شده نیست و آلاینده می‌تواند همراه با بارندگی یا رواناب آب‌های سطحی در تودهٔ خاک در جهت ثقل حرکت کند و خود را به منابع آب زیرزمینی برساند. متداول‌ترین آلاینده‌های نفتی شامل هیدروکربن‌های نفتی کل (TPH)، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAHs) و ترکیبات آلیفاتیک می‌باشد که از این میان PAHs به‌دلیل طولانی بودن زمان تجزیه‌پذیری آنها در محیط از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشند[۱]. هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای از ترکیبات سمی، جهش‌زا و سرطان‌زا می‌باشند [2]. این آلاینده‌های آلی در مقابل تجزیه شدن بسیار مقاوم هستند و معمولا در محل‌های مرتبط با تولید نفت و گاز و صنایع پردازش چوب یافت می‌شوند [3]. هیدروکربن‌های آروماتیک حدود ۲۰ تا ۴۰٪ نفت خام را تشکیل می‌دهند و این ترکیبات می‌توانند از طریق نشت مواد نفتی که در طی استخراج، فرآوری و انتقال رخ می‌دهد، سبب ایجاد آلودگی‌های محدود و یا گسترده در آب و خاک شوند [4]. گزارش‌هایی از وجود آلودگی نفتی در اطراف پالایشگاه‌ها و تأسیسات نفتی ایران ارائه شده‌است [1]. بروز این نوع آلودگی در کشوری هم‌چون ایران به‌علت در اختیار داشتن نزدیک به ۹٪ منابع نفتی جهان و وجود بیش از ۱۴۰۰۰ کیلومتر خط انتقال نفت، امری حتمی به‌نظر می‌رسد [5].

انواع مختلفی از ترکیبات PAHs در محیط وجود دارد، لیکن آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا (US. EPA)، ۲۸ هیدروکربن آروماتیک را به‌عنوان ترکیبات خطرناک معرفی کرده‌است [3]. فنانترن یکی از هیدروکربن‌های آروماتیک با سه حلقه بنزن می‌باشد که در گروه آلایندهٔ الویت‌دار قرار گرفته‌است. در ایران بیشینه غلظت این مادهٔ آلی که تاکنون گزارش شده‌است، مربوط به خاک مناطق نفتی استان بوشهر به‌میزان mg/kg ۱۸۶/۵۸ می‌باشد [1]. هم‌چنین حضور این ماده در مناطق مجاور تأسیسات نفتی ری و پالایشگاه نفت تهران نیز گزارش شده‌است[7, ٦].

آلودگی خاک علاوه‌بر تهدیدات و اثرات مخرب زیست‌محیطی، از نظر ژئوتکنیکی نیز حائز اهمیت می‌باشد، زیرا با ورود آلاینده به خاک امکان تغییر رفتار مهندسی خاک و درنتیجه ایجاد خسارت برروی سازه‌های بناشده روی آنها وجود دارد. پژوهشگران زیادی به بررسی تغییرات فیزیکی و مکانیکی خاک آلوده به آلاینده‌های آلی پرداختند و گزارش نمودند که پارامترهایی مانند نفوذپذیری، زاویهٔ اصطکاک داخلی، تراکم‌پذیری، حدود اتربرگ و مقاومت خاک پس از آلوده شدن تغییر می‌کند[۱۲ -8]. با در نظر گرفتن مسائل یاد شده، به‌منظور حفاظت از محیط زیست و تأمین محیطی سالم برای زندگی انسان و سایر موجودات، می‌بایست از ورود این آلاینده به منابع آب جلوگیری نمود که این امر با پاک‌سازی خاک‌های آلوده امکان‌پذیر می‌باشد. امروزه به‌سازی خاک‌های آلوده به روش‌های مختلف با هدف بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی خاک و به‌منظور استفاده از آنها به‌عنوان منبع قرضه برای اجرای پروژه و یا احداث سازه برروی آنها در حال انجام می‌باشد. یکی از روش‌های به‌سازی، روش شیمیایی است که در این روش مواد افزودنی مانند سیمان، آهک، خاکستر بادی و یا اختلاطی از آنها با نسبت‌های متفاوت با یکدیگر به خاک اضافه می‌شوند و واکنش‌های شیمیایی که بین ذرات خاک و مواد افزونی رخ می‌دهد، سبب بهبود خواص خاک می‌شود. بررسی منابع نشان می‌دهد که سیمان به‌صورت گسترده برای به‌سازی خاک غیرآلوده و خاک آلوده به آلاینده‌های آلی مورد استفاده قرار گرفته‌است [24-10]. در تولید سیمان انرژی قابل توجهی صرف می‌شود، هم‌چنین گاز کربن‌دی‌اکسید زیادی وارد محیط می‌شود؛ به همین دلیل در سال‌های اخیر، پژوهشگران به‌دنبال

جایگزینی مناسب برای سیمان که در تولید آن انرژی کمتری صرف شده و گاز کربن‌دی‌اکسید کمتری تولید شده باشد، بوده‌اند. منیزیم‌اکسید یکی از آن مواد افزودنی جایگزین می‌باشد که در سال‌های اخیر به‌تنهایی و یا اختلاط آن با مواد افزودنی دیگر برای به‌سازی خاک مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌است [29-25 ,23 ,22]. به‌طور کلی سه نوع منیزیم‌اکسید (light-burnt ، hard-burnt و dead-burnt) تولید می‌شود که تفاوت آنها با یکدیگر در دمای پخت و میزان واکنش‌پذیری‌شان می‌باشند [30]. در این بین منیزیم‌اکسید light-burnt که نام دیگر آن منیزیم‌اکسید واکنش‌پذیر است، در پژوهش‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌است [28-26]. این نوع منیزیم‌اکسید، در دمای کمتر از ۱۰۰۰ °C تولید می‌شود، بنابراین انرژی کمتری در تولید آن در مقایسه با سیمان پرتلند (که در دمای ۱۴۵۰ °C تولید می‌شود) مصرف می‌شود. هم‌چنین واکنش‌پذیری منیزیم‌اکسید مذکور، در مقایسه با دو نوع دیگر منیزیم‌اکسید تولیدی بیشتر می‌باشد [30]. لازم به ذکر است که در تولید منیزیم‌اکسید مقدار زیادی گاز کربن‌دی‌اکسید تولید می‌شود لیکن ۶۳ تا ۷۹٪ گاز کربن‌دی‌اکسید، هنگام واکنش‌های کربناسیون جذب می‌گردد [26]. در واقع منیزیم‌اکسید قادر به جذب گاز کربن‌دی‌اکسید محیط نیز می‌باشد.

اخیرا پژوهشگرانی از جمله لی و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی تأثیر افزودن منیزیم‌اکسید، آهک زنده و سیمان پرتلند در تثبیت و جامدسازی خاک آلوده به فلزات سنگین پرداختند و نتیجه گرفتند که هر یک از مواد افزودنی ذکر شده، برای به‌سازی و جامدسازی خاک آلوده به آلایندهٔ معدنی مشخصی مناسب می‌باشند و انتخاب نوع مادهٔ افزودنی بستگی به نوع آلایندهٔ غالب در خاک دارد؛ به‌عنوان مثال منیزیم‌اکسید سبب کاهش بیشتر غلظت آلاینده‌های معدنی از جمله سرب، کادمیم و روی در مقایسه با افزودنی‌هایی مانند آهک و سیمان می‌شود [27].

هم‌چنین وانگ و همکاران در سال ۲۰۲۱ به بررسی تثبیت و جامدسازی خاک آلوده به آلایندهٔ آلی دی‌متیل فتالات بااستفاده از ترکیب منیزیم‌اکسید و سربارهٔ کورهٔ ذوب آهن (GGBS) پرداختند. نتایج آنها نشان داد که عملکرد این ترکیب در مقایسه با سیمان پرتلند و ترکیب سیمان پرتلند و خاکستر بادی بهتر می‌باشد [29].

جانداری و همکاران نیز در پژوهش خود به بررسی به‌سازی خاک آلوده به گلیسرول با افزودن منیزیم‌اکسید پرداختند. نتایج آنها نشان داد که محصولات به‌دست‌آمده از کربناسیون منیزیم‌اکسید و نمک آلی– معدنی تولیدشده در خاک سبب افزایش مقاومت خاک آلوده می‌شود [25]. بررسی منابع نشان می‌دهد که گرچه در سال‌های اخیر به‌سازی خاک بااستفاده از منیزیم‌اکسید صورت گرفته‌است، لیکن تاکنون پژوهشی در زمینهٔ به‌سازی خاک آلوده به آلایندهٔ هیدروکربنی نفتی صورت نپذیرفته‌است.

ضرورت تحقیق

گاهی اوقات ضروری است پروژه‌ها در مناطقی اجرا گردند که در آن نواحی، خاک قرضهٔ موجود به دلایل مختلف به مواد آلاینده نفتی آلوده شده‌است و امکان دسترسی و انتقال خاک طبیعی مطلوب هم به محل پروژه مقدور و مقرون به صرفه نباشد. بنابراین، این مسائل ایجاب می‌کند که خواص خاک آلودهٔ موجود در آن منطقه بررسی گردد و روش‌های به‌سازی آن، مورد مطالعه قرار گیرد که در صورت عدم ایجاد مشکل در محیط زیست، در اجرای پروژه‌ها می‌توان از آن خاک به‌سازی‌شده، استفاده کرد. هم‌چنین زمین‌هایی که در اطراف پالایشگاه‌های تصفیهٔ نفت، مجتمع‌های پتروشیمی و سایر صنایع شیمیایی قرار دارند، ممکن است تحت تأثیر شرایط مختلف مانند وارد شدن پساب این تأسیسات، آلوده به مواد آلاینده شوند. آلاینده‌های مذکور ممکن است از طریق باران و آب‌های سطحی تحت تأثیر نیروی ثقل به اعماق پایین‌تر انتقال یابند و درنهایت به سفره‌های آب زیرزمینی برسند و مشکلات زیست‌محیطی ایجاد کنند؛ بنابراین خاک آلوده می‌بایست به‌نحوی به‌سازی شود که هم نفوذپذیری آن کم گردد و هم تبدیل مواد آلاینده به مواد غیرسمی میسر گردد. برای ارزیابی به‌سازی

صورت‌گرفتهٔ خاک در هر حالت و هر شرایطی می‌بایست، خواص فیزیکی و مکانیکی آن مانند مقاومت مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر ماده افزودنی منیزیم‌اکسید بر بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی خاک آلوده به مادهٔ آلی فنانترن می‌باشد. به این منظور آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت تک‌محوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برروی نمونه‌های خاک طبیعی، خاک آلوده، خاک طبیعی و آلودهٔ اختلاط‌یافته با درصدهای مختلف منیزیم‌اکسید صورت گرفته‌است و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شده و بحث لازم در خصوص آنها صورت پذیرفته‌است.

مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده در این پژوهش شامل خاک رسی، مادهٔ آلی فنانترن، استون و منیزیم‌اکسید می‌باشد. ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی آنها در ادامه توضیح داده خواهد شد.

خاک

خاک رسی مورد استفاده در این پژوهش از قرضه‌ای واقع در اطراف دشت تاکستان در استان قزوین تهیه شد. به‌منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک مورد مطالعه، آزمایش‌های وزن مخصوص ذرات جامد (G_s)، دانه‌بندی، حدود اتربرگ، تراکم براساس استاندارد ASTM روی خاک مورد نظر صورت گرفت، که نتایج آنها در جدول (۱) آورده شده‌است. براساس نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های دانه‌بندی و حدود اتربرگ، این خاک در سیستم طبقه‌بندی خاک یونیفاید (USCS)، رس با خاصیت خمیری (پلاستیسیته) پایین (CL) طبقه‌بندی گردید. همچنین براساس نتایج آزمایش تراکم استاندارد، وزن واحد حجم خشک بیشینه (γ_{dmax}) و درصد رطوبت بهینهٔ (w_{opt}) خاک مورد استفاده به‌ترتیب برابر (kN/m^3) ۱٦/۸ و ۱۸٪ تعیین شد. آزمایش‌های تعیین ویژگی‌های شیمیایی خاک نیز صورت پذیرفت که نتایج آن در جدول (۲) آورده شده‌است. همچنین آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) روی خاک انجام شد و نتایج نشان داد که کانی‌های این خاک شامل کوارتز، کلسیت و فلدسپار (سدیم، کلسیم و پتاسیم) و کانی‌های رسی غالب آن ایلیت و کلریت می‌باشد.

جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک

ویژگی	مقدار
وزن مخصوص دانه‌های جامد(G_s)	۲/۷
ماسه (٪)	۲
سیلت (٪)	٤۵
رس (٪)	۵۳
حد روانی (٪)	٤۷
حد خمیری (٪)	۲٦
شاخص خمیری (٪)	۲۱
بیشینه وزن واحد حجم خشک بیشینه(kN/m^3)	۱٦/۸
درصد رطوبت بهینه (٪)	۱۸

جدول ۲ ویژگی‌های شیمیایی خاک

ویژگی	مقدار
pH	۸
(dS/m) EC	۱۰/۷٤
(meq/l) K^+	۰/۳۳
(meq/l) Ca^{2+}	۲٤
(meq/l) Mg^{2+}	۱۰
(meq/l) CL^-	٦۰
(meq/l) CO_3^{2-}	۰/٦
(meq/l) HCO_3^-	٤
(meq/l) SO_4^{2-}	۸۳
(%) $CaCO_3$	۱۰/۲
(%) O.C.	۰/۰۵

فنانترن

فنانترن یک هیدروکربن آروماتیک سه‌حلقه‌ای است که به‌صورت طبیعی در سوخت‌های فسیلی وجود دارد. هم‌چنین این ماده از سوختن ناقص ترکیبات آلی مانند سوخت‌های فسیلی و چوب به‌وجود می‌آید. از فنانترن در تولید رنگ، دارو، مواد منفجره و پژوهش‌های بیوشیمی استفاده می‌شود [31]. در پژوهش حاضر به‌منظور آلوده نمودن خاک از فنانترن با خلوص ۹۷٪ که از تولیدات شرکت مرک آلمان است، استفاده شد.

استون

باتوجه به این که ماده آلی فنانترن دارای حلالیت بسیار پایینی در آب می‌باشد (۱/۱۵ mg/l)، در این پژوهش از استون به‌عنوان حلال استفاده گردید. استون مورد استفاده در این پژوهش، محصولی از شرکت شیمی دارویی نوترون با درجهٔ خلوص ۹۹/۹٪ می‌باشد.

منیزیم‌اکسید

در این کار پژوهشی، از منیزیم‌اکسید برای بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک رسی و خاک آلوده به آلایندهٔ آلی استفاده گردید. منیزیم‌اکسید به‌کار رفته، محصولی از شرکت شیمی دارویی نوترون است و شامل ۹٤/۲٪ منیزیم‌اکسید، ۱/۷٪ کلسیم‌اکسید، ۰/۸۵٪ سیلیسیم‌اکسید و ۰/٦۲٪ فریک‌اکسید و ۰/۱٦٪ آلومینیوم‌اکسید می‌باشد. وزن مخصوص، میانگین اندازهٔ ذرات و سطح ویژهٔ آن نیز به‌ترتیب معادل ۳/۵۵، ٦۰ (μm) و ۲۵۰–۳۰۰ (m^2/g) می‌باشد.

تهیهٔ خاک آلوده

در این پژوهش برای تهیهٔ نمونه خاک آلوده، از مادهٔ آلی فنانترن با درصد وزنی ۰/۱۲٪ (۱۲۰۰ میلی‌گرم در یک کیلوگرم خاک) استفاده گردید. از آنجا که فنانترن ماده‌ای جامد است، می‌بایست قبل از اضافه کردن به خاک در حلالی مناسب به‌صورت کامل حل گردد. سپس به‌منظور توزیع یکنواخت در خاک، به‌صورت اسپری به خاک اضافه شود. حلالیت فنانترن در آب بسیار کم می‌باشد، به همین علت از استون که حلالی مناسب برای این ماده است و به‌سرعت در محیط تبخیر می‌شود، استفاده گردید. پژوهشگران دیگری نیز از استون برای حل کردن فنانترن در پژوهش‌های خود استفاده نموده‌اند [32-34]. به‌منظور انجام کامل واکنش‌های شیمیایی بین آلاینده و خاک، خاک آلوده به‌مدت یک هفته در کیسهٔ پلاستیکی مسدودشده نگه‌داری شد [10].

ساخت و نگه‌داری نمونه‌ها

نمونه‌های خاک مورد بررسی در این پژوهش شامل خاک طبیعی، خاک آلوده به فنانترن و خاک طبیعی و آلودهٔ اختلاط‌یافته با منیزیم‌اکسید در درصدهای وزنی ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ می‌باشد. برای ساخت نمونه‌های خاک، ابتدا آزمایش تراکم استاندارد برروی نمونه‌های مختلف براساس استاندارد ASTM-D698-12$^{\varepsilon 2}$ صورت گرفت [35] و منحنی‌های تراکمی هر یک از آنها تعیین شد. سپس براساس مشخصات نقطهٔ بهینهٔ هر یک از منحنی‌های تراکمی، اقدام به ساخت نمونه‌های مربوط به‌روش تراکم استاتیکی شد. نمونه‌های خاک بااستفاده از دستگاه بارگذاری تک‌محوری در سه لایه و با سرعت mm/min ۱/۵ متراکم گردیدند. نمونه‌های ساخته‌شده دارای قطر و ارتفاع معادل ۵۰ mm و قطر ۱۰۰ mm بودند. نمونه‌های حاوی منیزیم‌اکسید پس از ساخت در اتاقکی با رطوبت بالای ۹۵٪ و دمای ۲۵ °C نگه‌داری شدند (مشابه شرایط نگه‌داری به‌کاررفته در پژوهش استبرق و همکاران [23]) و در زمان‌های عمل‌آوری ۳، ۷، ١٤ و ۲۸ روز از اتاقک خارج و آزمایش مقاومت تک‌محوری برروی آنها انجام گردید.

آزمایش حدود اتربرگ

به‌منظور بررسی اثر افزودن مادهٔ آلی فنانترن و مادهٔ افزودنی منیزیم‌اکسید برروی مقادیر حدود اتربرگ،

حدود روانی و خمیری نمونه‌های خاک طبیعی، خاک آلوده به فنانترن و خاک طبیعی و خاک آلوده حاوی درصدهای مختلف منیزیم‌اکسید براساس استاندارد ASTM-D4318-17 ^{ε1} تعیین گردید [36].

آزمایش مقاومت تک‌محوری

آزمایش مقاومت تک‌محوری (UCS) براساس ASTM-D1633-17 روی نمونه‌های مختلف خاک صورت پذیرفت [37]. نمونه‌ها پس از قرارگیری در دستگاه بارگذاری، با سرعت ۱ mm/min تا گسیختگی کامل تحت تأثیر اعمال بار قرار گرفتند. در طول آزمایش، مقادیر بار اعمال شد و تغییر شکل ایجادشده در نمونه‌ها ثبت گردید و بااستفاده از داده‌های ثبت‌شده اقدام به تعیین منحنی تنش–کرنش هر یک از آنها شد. لازم به ذکر است که در این کار پژوهشی آزمایش مقاومت تک‌محوری برای هر یک از حالت‌های مورد بررسی، با سه تکرار صورت گرفت. سپس در صورت نزدیک بودن نتایج، میانگین آنها به‌عنوان نتیجهٔ نهایی منظور گردید. حال اگر یکی از نتایج آزمایش‌ها با دو آزمایش دیگر اختلاف معنی‌داری داشت، آن نمونه حذف شد و میانگین نتایج باقی‌مانده گزارش گردید.

SEM

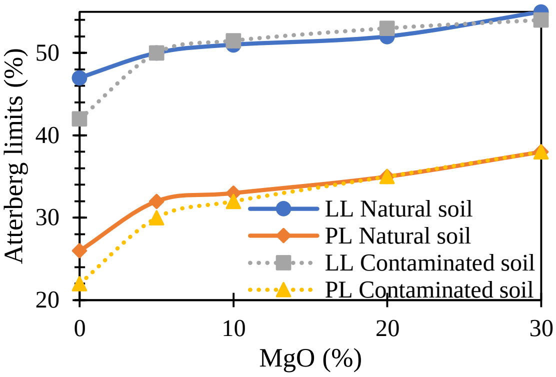
تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) امکان بررسی و تحلیل ریزساختار نمونه‌های خاک را در ابعاد میکرونی فراهم کرده‌است. در این پژوهش، آزمایش SEM روی نمونه‌های خاک طبیعی، خاک آلوده به فنانترن، خاک طبیعی اختلاط‌یافته با ۵ و ۳۰٪ منیزیم‌اکسید و خاک آلودهٔ اختلاط‌یافته با ۵ و ۳۰٪ منیزیم‌اکسید در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز صورت گرفت. آماده سازی نمونه‌ها برای انجام آزمایش SEM به این صورت بود که از وسط نمونه‌ها، بخش کوچکی جدا گردید و برروی پایه‌ای مخصوص برای عمل پوشش‌دهی طلا قرار داده شد. سپس بااستفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی اقدام به عکس‌برداری گردید. این آزمایش در آزمایشگاه SEM پژوهشگاه مواد و انرژی انجام گردید.

نتایج

در این پژوهش تعداد ۱۰ آزمایش حدود اتربرگ، ۱۰ آزمایش تراکم استاندارد، ۱۰۲ آزمایش مقاومت تک-محوری و ٦ آزمایش SEM برروی نمونه‌های خاک طبیعی، خاک آلوده به فنانترن، خاک طبیعی و آلودهٔ اختلاط‌یافته با درصدهای مختلف منیزیم‌اکسید انجام پذیرفت. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های صورت‌گرفته به‌شرح زیر می‌باشد.

نتایج آزمایش حدود اتربرگ

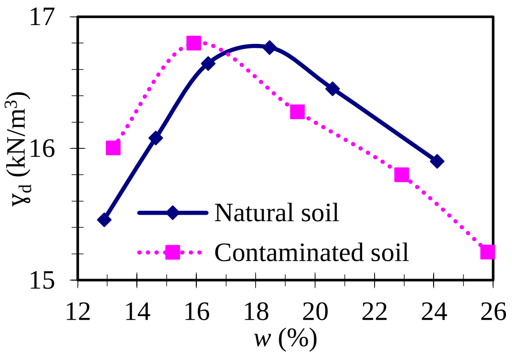
نتایج آزمایش حدود اتربرگ نمونه‌های خاک طبیعی، خاک آلوده به فنانترن و خاک طبیعی و آلودهٔ اختلاط‌یافته با منیزیم‌اکسید در درصدهای مختلف در شکل (۱) نشان داده شده‌است. براساس این شکل، حدود روانی و خمیری خاک طبیعی به‌ترتیب برابر ٤٧ و ٢٦٪ می‌باشد. با افزودن منیزیم‌اکسید در درصدهای گوناگون به خاک، حدود اتربرگ افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال افزودن ۵٪ منیزیم‌اکسید به خاک، حدود روانی و خمیری خاک را به ۵۰ و ۳۲٪ رسانده‌است که این مقادیر به‌ازای افزودن ۳۰٪ منیزیم‌اکسید برابر ۵۵ و ۳۸٪ می‌باشد. هم‌چنین این شکل نشان می‌دهد که اضافه کردن فنانترن به خاک سبب کاهش ۵ درصدی حد روانی و ٤ درصدی حد خمیری در مقایسه با خاک طبیعی شده‌است. این مقادیر با افزودن منیزیم‌اکسید به خاک آلوده افزایش پیدا کرده‌است. به‌عنوان مثال اضافه کردن ۳۰٪ منیزیم‌اکسید به خاک آلوده حد روانی و حد خمیری را به‌ترتیب به مقادیر ٥٤ و ۳۸٪ رسانده‌است. به‌طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که افزودن منیزیم‌اکسید به خاک طبیعی و خاک آلوده به فنانترن سبب افزایش حدود روانی و خمیری می‌شود.



شکل ۱ نتایج حدود اتربرگ نمونه‌های خاک مورد مطالعه

نتایج آزمایش تراکم استاندارد

شکل (۲)، منحنی تراکمی نمونه‌های خاک طبیعی، خاک آلوده به فنانترن را نشان می‌دهد. براساس این شکل، افزودن فنانترن به خاک سبب کاهش رطوبت بهینهٔ خاک شده‌است و آن را از ۱۸ به ۱۶٪ رسانده‌است لیکن افزودن این مادهٔ آلی تأثیری در مقدار وزن واحد حجم خشک بیشینه نداشته‌است و مقدار آن برابر ۱۶/۸ kN/m^3 گردیده‌است.



شکل ۲ منحنی تراکم نمونه‌های خاک طبیعی و آلودهٔ مورد مطالعه

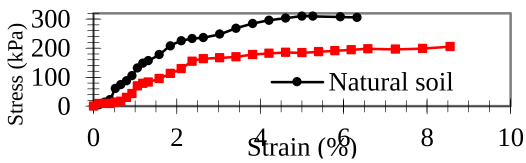
پارامترهای تراکمی نمونه‌های به‌سازی‌شده با منیزیم-اکسید براساس منحنی‌های تراکمی به‌دست‌آمده برای هر یک از آنها تعیین گردید و نتایج آنها در جدول (۳) آورده شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزودن منیزیم‌اکسید سبب کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه در نمونه‌های خاک طبیعی و آلودهٔ حاوی منیزیم‌اکسید شده‌است.

جدول ۳ پارامترهای تراکمی نمونه‌های خاک طبیعی و آلودهٔ به‌سازی شده

	پارامترهای تراکمی			
	w (%)		γ_{dmax} (kN/m^3)	
MgO (٪)	خاک طبیعی	خاک آلوده	خاک طبیعی	خاک آلوده
۵	۲۱	۲۱/۸	۱۵/۲	۱۵/۳
۱۰	۲۱	۲۲	۱۵	۱۵/۱
۲۰	۲۲/۸	۲۳/۵	۱۴/۹	۱۵
۳۰	۲۳/۷	۲۴	۱۴/۸	۱۴/۸

نتایج آزمایش مقاومت تک‌محوری

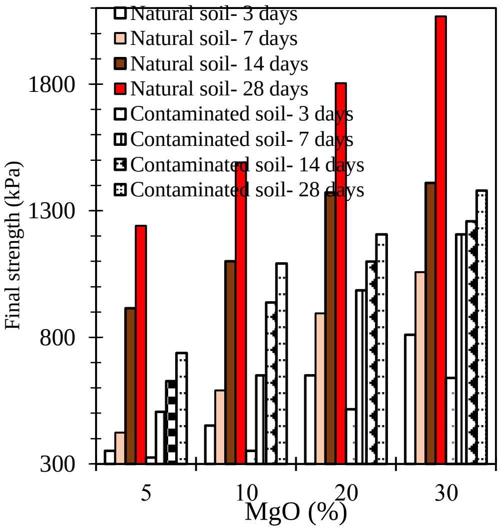
شکل (۳)، منحنی‌های تنش- کرنش نمونه‌های خاک طبیعی و خاک آلوده به فنانترن را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد، آلوده کردن خاک با مادهٔ آلی فنانترن سبب تغییر مقاومت خاک از ۳۰۶ به kPa ۲۰۳ شده‌است. درواقع افزودن فنانترن به خاک سبب کاهش ۳۴ درصدی مقاومت فشاری در مقایسه با خاک طبیعی شده‌است. هم‌چنین مشاهده می‌شود که گسیختگی نمونه خاک طبیعی در کرنش ۶٪ و خاک آلوده در کرنش ۸/۵٪ اتفاق افتاده‌است.



شکل ۳ منحنی تنش- کرنش خاک طبیعی و خاک آلوده

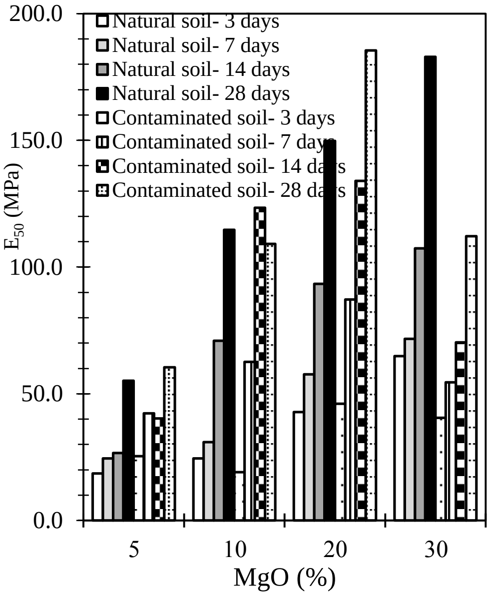
نتایج مقاومت فشاری نهایی به‌دست‌آمده از منحنی-های تنش- کرنش نمونه‌های خاک طبیعی و آلودهٔ حاوی منیزیم‌اکسید در درصدهای وزنی ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ و زمان‌های عمل‌آوری ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز به‌صورت نمودار میله‌ای در شکل (۴) نشان داده شده‌است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، در هر یک از درصدهای ثابت مادهٔ

افزودنی، مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های خاک طبیعی و آلوده با گذشت زمان افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال با افزودن ۵٪ منیزیم‌اکسید به خاک طبیعی، مقاومت فشاری نهایی آن از ۳۰٦ به مقادیر ۳۵۲ و ۱۲٤۰ کیلوپاسکال به‌ترتیب در زمان‌های عمل‌آوری ۳ و ۲۸ روز رسیده‌است که با افزایش درصد مادهٔ افزودنی به ۳۰٪، این مقادیر به‌ترتیب برابر ۸۱۰ و ۲۰٦۸ کیلوپاسکال به‌دست‌آمده‌است. این مقادیر برای خاک آلوده به‌ازای افزودن ۵٪ منیزیم‌اکسید به‌ترتیب برابر ۳۲۵ و ۷۳۸ کیلوپاسکال و به‌ازای افزودن ۳۰٪ منیزیم‌اکسید به‌ترتیب برابر ٦٤۰ و ۱۳۸۰ کیلوپاسکال شده‌است. درواقع می‌توان بیان کرد که مقاومت فشاری نهایی خاک طبیعی و آلودهٔ به‌سازی‌شده با منیزیم‌اکسید، با افزایش درصد مادهٔ افزودنی و زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد. هم‌چنین مقایسهٔ نتایج مقاومت فشاری نهایی خاک طبیعی با آلوده در شکل (٤) نشان می‌دهد که به‌طور کلی مقاومت فشاری نمونه‌های خاک طبیعی به‌سازی‌شده، بیشتر از نمونه‌های خاک آلودهٔ به‌سازی شده با منیزیم‌اکسید می‌باشد.



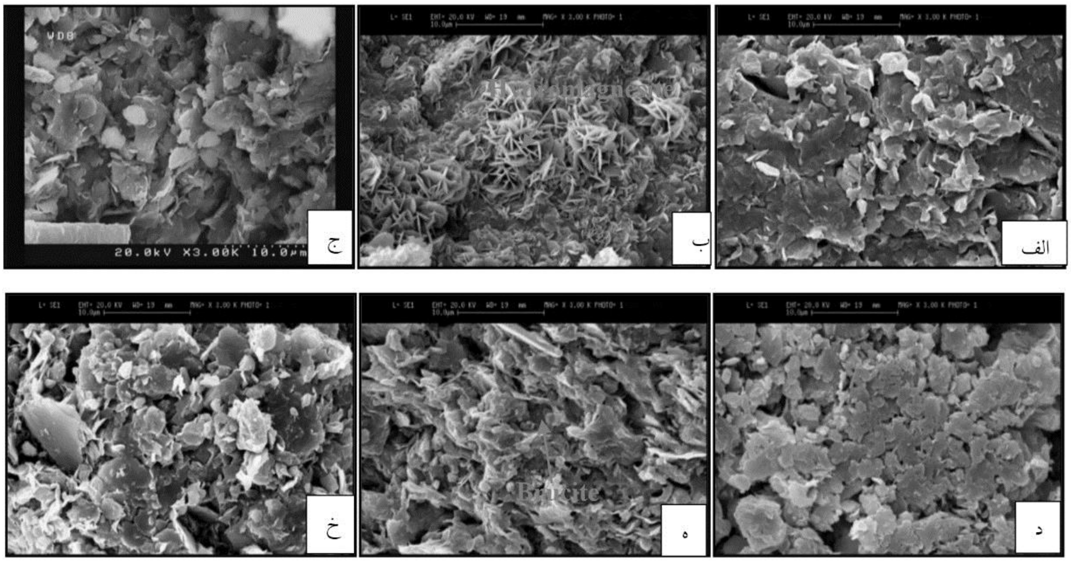
شکل ٤ مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های به‌سازی‌شده با منیزیم‌اکسید

هم‌چنین ضریب کشسانی (الاستیک) مربوط به ۵۰٪ از مقاومت نهایی نمونه‌ها (E_{50}) نمونه‌ها براساس منحنی‌های تنش-کرنش هر یک از نمونه‌ها محاسبه گردید.



شکل ۵ تغییرات E_{50} نمونه‌های به‌سازی‌شده با منیزیم‌اکسید

باتوجه به شکل (۳) و محاسبات صورت‌گرفته، E_{50} خاک طبیعی و خاک آلوده به‌ترتیب برابر ۱۲/۲ و MPa ٦/۱ به‌دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که افزودن فنانترن به خاک سبب کاهش ضریب کشسانی نمونه خاک آلوده در مقایسه با خاک طبیعی می‌شود. نتایج محاسبات مربوط به نمونه‌های خاک طبیعی و آلودهٔ حاوی منیزیم‌اکسید در شکل (۵) آورده شده‌است. این شکل نشان می‌دهد که افزودن منیزیم‌اکسید به نمونه‌های خاک سبب افزایش E_{50} در مقایسه با نمونه‌های خاک آلوده و طبیعی می‌شود. هم‌چنین مقایسهٔ مقادیر E_{50} نمونه‌های به‌سازی‌شده نشان می‌دهد که به‌ازای درصد ثابت مادهٔ افزودنی، مقادیر ضریب کشسانی با گذشت زمان افزایش می‌یابد. هم‌چنین به‌ازای زمان عمل‌آوری ثابت، افزایش E_{50} نمونه‌های خاک با افزایش درصد مادهٔ افزودنی مشاهده می‌شود (البته این امر در برخی از نمونه‌های آلوده صادق نمی‌باشد که علت آن به شکل منحنی تنش- کرنش نمونه‌های خاک و پراکندگی داده‌های ثبت‌شده مرتبط می‌باشد). علاوه‌بر این مقایسهٔ نتایج نشان می‌دهد که به‌ازای افزودن ۳۰٪ از مادهٔ افزودنی، E_{50} نمونه‌های خاک طبیعی حاوی منیزیم‌اکسید بیشتر از نمونه‌های آلودهٔ حاوی منیزیم‌اکسید می‌باشد.



شکل ۶ تصاویر SEM نمونه‌های خاک با بزرگ‌نمایی ۳۰۰۰ برابر الف) خاک طبیعی، ب) خاک طبیعی + ۵٪ منیزیم‌اکسید، ج) خاک طبیعی + ۳۰٪ منیزیم‌اکسید، د) خاک آلوده، ه) خاک آلوده + ۵٪ منیزیم‌اکسید و خ) خاک آلوده + ۳۰٪ منیزیم‌اکسید

نتایج SEM

شکل (۶) تصاویر SEM نمونه‌های مختلف خاک را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۶-الف) مشاهده می‌شود که خاک طبیعی دارای ساختار لخته می‌باشد که افزودن فنانترن به آن سبب تغییر ساختار خاک شده و آن را به‌سمت پراکنده شدن تغییر داده‌است (شکل ۶-د). با اضافه کردن منیزیم‌اکسید به خاک، ساختار نمونه‌های خاک (شکل‌های ۶-ب و ۶-ج) در مقایسه با نمونه خاک طبیعی لخته‌تر شده و فضاهای خالی بین ذرات به‌وسیلهٔ مواد به‌دست‌آمده از کربناسیون و واکنش‌هایی که در محیط خاک رخ داده‌است، پر شده‌است. این امر در نمونه‌های آلودهٔ به‌سازی‌شده (شکل‌های ۶-ه و ۶-خ) نیز مشاهده می‌گردد.

بحث

نتایج آزمایش حدود اتربرگ نشان می‌دهد که افزودن فنانترن به خاک سبب کاهش حدود اتربرگ در مقایسه با خاک طبیعی شده‌است. در واقع با افزودن فنانترن به خاک، بخشی از آن سطح ذرات خاک را می‌پوشاند و از آنجا که این مادهٔ آلی غیرقطبی است، کاهش پتانسیل جذب آب توسط ذرات و در نتیجه کاهش حدود اتربرگ را سبب می‌شود. هم‌چنین شکل (۱) نشان می‌دهد که افزودن درصدهای مختلف منیزیم‌اکسید به خاک طبیعی و خاک آلوده، سبب افزایش حدود اتربرگ می‌شود که این افزایش تابعی از درصد مادهٔ افزودنی می‌باشد. دلیل این امر آن است که مادهٔ افزودنی منیزیم‌اکسید دارای سطح ویژهٔ بالایی(m^2/g ۳۰۰-۲۵۰) می‌باشد که این امر سبب افزایش قدرت جذب آب توسط ذرات و درنتیجه افزایش حدود اتربرگ می‌گردد. این نتایج با یافته‌های پژوهشگران دیگر نیز مطابقت دارد [23, 25].

نتایج آزمایش تراکم در شکل (۲) نشان می‌دهد که آلوده کردن خاک با مادهٔ آلی فنانترن سبب کاهش ۲٪ رطوبت بهینه می‌شود، لیکن وزن واحد حجم خشک بیشینه تغییری نمی‌کند. هم‌چنین مقایسهٔ دو عکس SEM در شکل (۶-الف و د) نشان‌دهندهٔ تغییر ساختار خاک از

حالت لخته به پراکنده می‌باشد؛ بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که آلوده کردن خاک سبب تغییر ساختار و کاهش فضاهای بین ذرات، در مقایسه با خاک طبیعی شده‌است. در خاک طبیعی با اضافه کردن رطوبت و اعمال انرژی تراکمی بر آن، امکان جابه‌جایی ذرات وجود دارد، لیکن این جابه‌جایی در خاک آلوده به‌علت داشتن ساختار پراکنده و محدودیت فضاهای خالی بین ذرات کمتر رخ داده‌است. این امر سبب تغییر نکردن وزن واحد حجم خشک بیشینه در دو خاک طبیعی و آلوده شده‌است. این نتایج با نتایج ارائه‌شده توسط پژوهشگران دیگر هم‌خوانی ندارد [25 ,12-10]. پژوهشگرانی مانند خلوصی و همکاران و حاجی‌محمدی و حمیدی، کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش درصد رطوبت بهینه به خاک را با افزودن مادهٔ هیدروکربنی آنتراسن به خاک گزارش نمودند. لیکن استبرق و همکاران و جانداری و همکاران نتیجه گرفتند که به‌ازای افزودن بیش از ۳٪ گلیسرول به خاک، وزن واحد حجم خشک بیشینه و درصد رطوبت بهینه، به‌ترتیب افزایش و کاهش پیدا کرده‌است.

مقایسهٔ مقادیر پارامترهای تراکمی در جدول (۳) نشان می‌دهد که افزودن منیزیم‌اکسید به خاک طبیعی و خاک آلوده سبب کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش درصد رطوبت بهینه می‌شود. هم‌چنین با مقایسهٔ تصاویر SEM تهیه‌شده در شکل (۶) می‌توان گفت که افزودن منیزیم‌اکسید به خاک سبب افزایش درجهٔ لختگی ذرات و افزایش فضاهای خالی بین آنها می‌شود. بنابراین باتوجه به نتایج آزمایش‌های تراکم و SEM می‌توان نتیجه‌گیری کرد که منیزیم‌اکسید به‌علت داشتن سطح ویژهٔ بالای ذرات، سبب افزایش درجهٔ لختگی ساختار خاک و افزایش فضاهای خالی بین آنها شده‌است. هم‌چنین با لخته‌شدن ساختار، ذرات درشت‌دانه‌تر می‌شوند و سطح ویژهٔ آنها کاهش می‌یابد؛ درنتیجه پتانسیل جذب آب نیز کاهش پیدا می‌کند و رطوبت اضافه شده در حین آزمایش تراکم، در بین ذرات قرار می‌گیرد و با اعمال انرژی تراکمی، ذرات به‌علت وجود پیوندهای قوی که در بین آنها وجود دارد نمی‌توانند نسبت به‌هم جابه‌جا شوند، بنابراین موجبات کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینهٔ آنها فراهم می‌گردد. این نتایج با نتایج گزارش‌شده توسط پژوهشگران دیگر هماهنگی دارد [25 ,23].

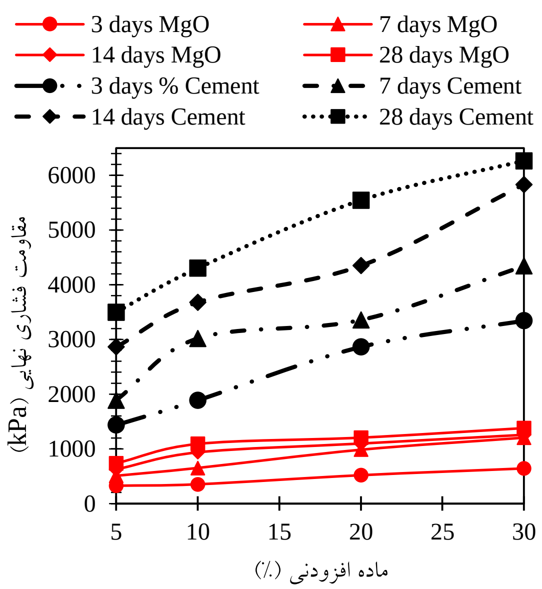
نتایج آزمایش مقاومت تک‌محوری (شکل ۳) نشان می‌دهد که مقاومت خاک با آلوده شدن با فنانترن، کاهش پیدا کرده‌است. دلیل این امر آن است که خاک طبیعی به‌علت داشتن ساختار لخته، بین ذرات آن اصطکاک وجود دارد، لیکن این اصطکاک بین ذرات در خاک آلوده وجود ندارد و ذرات به‌راحتی برروی یکدیگر می‌لغزند که این امر سبب کاهش مقاومت آن در مقایسه با خاک طبیعی می‌گردد. پژوهشگران دیگر نیز کاهش مقاومت خاک آلوده به آلایندهٔ آلی را گزارش نموده‌اند [,12-10 25 ,20].

شکل (٤) نشان می‌دهد که افزودن منیزیم‌اکسید به خاک طبیعی و خاک آلوده، مقاومت فشاری نهایی را افزایش می‌دهد. با اضافه کردن منیزیم‌اکسید به خاک، منیزیم‌اکسید تحت فرآیند هیدراسیون به یون منیزیم تبدیل می‌شود و تبادل کاتیونی بین این یون و کاتیون‌های کانی‌های خاک صورت می‌گیرد. منیزیم‌اکسید با جذب آب به بروسیت ($Mg(OH)_2$) تبدیل می‌شود که این ماده توانایی چسباندن محدودی از ذرات را دارد. بروسیت تحت تأثیر شرایط مناسبی و با جذب آب و گاز کربن دی‌اکسید، واکنش‌های کربناسیونی انجام می‌دهد و به موادی به نام نسکوهنیت ($MgCO_3 . 3H_2O$)، دیپینجیت ($(Mg)_5(CO_3)_4(OH)_2 . 5H_2O$) و هیدرومگنزیت ($(Mg)_5(CO_3)_4(OH)_2 . 4H_2O$) تبدیل می‌گردد. این مواد فضاهای خالی بین ذرات را پر می‌کنند و سبب چسباندن ذرات به یکدیگر و درنتیجه افزایش مقاومت نمونه‌های خاک می‌شوند [38]. بدیهی است که عامل زمان در کسب مقاومت بسیار مهم است. تصاویر SEM تشکیل این مواد را حین فرآیند کربناسیون تأیید می‌کند. پژوهشگرانی مانند استبرق و همکاران و جانداری و همکاران نیز افزایش مقاومت خاک طبیعی و خاک آلوده به مادهٔ آلی

گلیسرول را با افزودن منیزیم‌اکسید گزارش نمودند [23, 25].

نتایج ضریب کشسانی متناظر با ۵۰٪ از مقاومت نهایی نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که این ضریب با افزایش زمان عمل‌آوری و درصد مادهٔ افزودنی افزایش یافته‌است. علت این امر آن است که فرآیند کربناسیون و تولید محصولات آن با گذشت زمان صورت می‌گیرد که این فرآیند سبب افزایش مقادیر E_{50} می‌شود.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مادهٔ افزودنی منیزیم‌اکسید، قابلیت به‌سازی خاک طبیعی و خاک آلوده به فنانترن را دارا می‌باشد. هم‌چنین آزمایش‌های مشابهی نیز روی نمونه‌هایی از خاک اختلاط‌یافته با درصدهای مختلف سیمان و زمان‌های عمل‌آوری گوناگون صورت پذیرفت که نتایج آن همراه با نتایج و کاربرد منیزیم‌اکسید، در شکل (۷) ارائه شده‌است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد، نمونه‌های به‌سازی‌شده با منیزیم‌اکسید در درصدهای یکسان و زمان‌های عمل‌آوری مشابه، دارای مقاومت نهایی کمتری نسبت به سیمان می‌باشند. براساس قیمت‌های اخذ شده از فروشندگان مصالح ساختمانی، هزینهٔ به‌سازی ۱ مترمکعب خاک با ۱۰٪ منیزیم‌اکسید، معادل ۲۲۷۰۰۰ تومان می‌گردد، لیکن برای به‌سازی آن با ۵٪ سیمان که مقاومت بیشتری از کاربرد درصد منیزیم‌اکسید مذکور دارد، مبلغ ۸٦۰۰۰ تومان محاسبه می‌شود. مقایسهٔ این ارقام و نیز مقاومت کسب‌شده نشان می‌دهد که برای به‌سازی خاک در شرایط کنونی کشور (پایین بودن نرخ مواد سوختی) مصرف سیمان به‌ظاهر اقتصادی و مطلوب می‌باشد. لیکن باید توجه داشت که برای تولید سیمان، به حرارتی با دمای ۱٤٥۰ درجهٔ سانتی‌گراد نیاز است که این خود سبب مصرف مقدار زیاد مواد سوختی می‌گردد، لیکن در تولید منیزیم‌اکسید حرارتی کمتر از ۱۰۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد مورد نیاز است؛ بنابراین اگر هزینهٔ انرژی به‌صورت واقعی مطابق آنچه در کشورهای غربی معمول است منظور گردد، هزینه‌های تولید آنها حدودا یکسان می‌شود. از طرفی منیزیم‌اکسید اثر تخریبی کمتری نسبت‌به سیمان در رابطه با مسائل زیست‌محیطی دارد، به‌طوری‌که در هنگام تولید، CO_2 کمتری وارد محیط می‌شود و از طرفی در حین مراحل هیدراسیون نیز، از محیط CO_2 جذب می‌نماید. پژوهشگران مختلف از جمله لی و همکاران و وانگ و همکاران با پژوهش‌های خود نیز به این نتیجه رسیده‌اند که در عملیات پاکسازی خاک‌های آلوده به مواد آلاینده، منیزیم‌اکسید عملکرد بهتری نسبت‌به سیمان دارد [27, 29]. بنابراین اگر هزینهٔ انرژی و سایر موارد با مبالغ واقعی منظور گردد و مقاومت ایجاد شده نیز مطلوب باشد، کاربرد منیزیم‌اکسید باتوجه به جمیع جهات، نسبت‌به سیمان ارجح است.



شکل ۷ مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های آلودهٔ اختلاط‌یافته با درصدهای مختلف منیزیم‌اکسید و سیمان در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت

نتیجه‌گیری

براساس مطالعات انجام‌شده در این پژوهش، نتایج زیر قابل استخراج است:

– براساس تصاویر SEM ارائه‌شده برای خاک طبیعی و آلوده، افزودن فنانترن به خاک رسی سبب تغییر ساختار خاک می‌شود و ساختار آن را به‌سمت پراکنده

شدن پیش می‌برد.

- افزودن مادۀ آلی فنانترن به خاک رسی، سبب کاهش درصد رطوبت بهینۀ آن در مقایسه با خاک طبیعی می‌گردد، لیکن مقدار وزن واحد حجم خشک بیشینه تغییر نمی‌یابد.
- فنانترن سبب کاهش مقاومت در مقایسه با خاک طبیعی می‌شود که اضافه کردن منیزیم‌اکسید به آن، مقاومت خاک آلوده و E_{50} را افزایش می‌دهد که این افزایش تابعی از درصد ماده افزودنی به‌کار رفته و زمان عمل‌آوری می‌باشد.
- نتایج آزمایش SEM مشخص نمود که افزودن فنانترن به خاک سبب تغییر ساختار خاک در مقایسه با خاک طبیعی می‌شود. از طرفی اضافه کردن منیزیم‌اکسید سبب تشکیل محصولات کربناسیون در نمونه‌های به‌سازی‌شده می‌گردد که این امر موجب پیوند ذرات خاک به یکدیگر و افزایش مقاومت می‌شود.

مراجع

١. شاکری، ع.، رضی کرد محله، ل. و اسماعیلی، ا. «بررسی غلظت هیدروکربن‌های نفتی کل، پلی هیدروآروماتیک‌ها و آلیفاتیک‌ها در خاک مناطق نفتی استان بوشهر»، پانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، تهران، دانشگاه خوارزمی، (١٣٩٠).

2. Harvey, R. G., "Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Chemistry and Carcinogenicity", Cambridge University Press, New York, (1991).

3. Kuppusamy, S., Thavamani, P., Venkateswarlu, K., Lee, Y. B., Naidu, R., and Megharaj, M., "Remediation Approaches for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Contaminated Soils: Technological Constraints, Emerging Trends and Future Directions", *Chemosphere*, Vol. 168, pp. 944–968, (2017).

4. Kharisov, B.I., Dias, H.V.R., and Kharissova, O. V., "Nanotechnology-based Remediation of Petroleum Impurities from Water", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 122, pp. 705–718, (2014).

5. https://www.ioptc.ir

٦. علایی، ا.، وکیلی، ف. و مهرداد شریف، ا.ع.، «گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فنانترن بااستفاده از گیاه سورگوم»، نشریه محیط‌شناسی، دورۀ ٣٦، شمارۀ ٥٣، صص. ٧٩–٨٨ (١٣٨٩).

7. Arbabi, M., Nasseri, S., and Chimezie, A., "Biodegradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Petroleum Contaminated Soils", *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, Vol. 28, No. 3, pp. 53–59, (2009).

8. Meegoda, N. J., and Ratnaweera, P., "Compressibility of Contaminated Fine-grained Soils", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 17, No. 1, pp. 101–112, (1994).

9. Khamehchiyan, M., Hossein Charkhabi, A., and Tajik, M., "Effects of Crude Oil Contamination on Geotechnical Properties of Clayey and Sandy Soils", *Engineering Geology*, Vol. 89, No. 3–4, pp. 220–229, (2007).

10. Estabragh, A. R., Khatibi, M., and Javadi, A. A., "Effect of Cement on Treatment of a Clay Soil Contaminated with Glycerol", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 28, No. 4, pp. 04015157-10, (2016).

۱۱. خلوصی، م.م.، رئیسی استبرق، ع، عبدالهی، ج.، «بررسی تغییرات خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک رسی آلوده به مادهٔ هیدروکربنی با افزودن سیمان»، نشریه مهندسی عمران مدرس، دورهٔ ۱۷، شمارهٔ ۲، صص. ۹۳-۱۰۶، (۱۳۹۶).

۱۲. حاجی محمدی، م. و حمیدی، ا.، «به‌سازی رفتار مکانیکی رس کائولینیت آلوده به آنتراسن با سیمان و آهک»، نشریه تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران) ، دورهٔ ۵۱، شمارهٔ ۷، صص. ۱۷۸۳-۱۷۹۵، (۱۳۹۹).

13. Sherwood, T. P., "Soil Stabilization with Cement and Lime: State of the Art Review", HMSO Books, London, (1993).

14. Bergado, D.T., Anderson, L.R., Miura, N., and Balasubramaniam, A.S., "Soft Ground Improvement in Lowland and Other Environments", ASCE Press, New York, (1996).

15. Al-Tabbaa, A., "Soil Mixing in the UK 1991–2001: State of Practice Report", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, Vol. 7, No. 3, pp. 117–126, (2003).

16. Puppala, A. J., Wattanasanticharoen, E., and Punthutaecha, K., "Experimental Evaluations of Stabilisation Methods for Sulphate-rich Expansive Soils", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, Vol. 7, No. 1, pp. 25–35, (2003).

17. Chew, S. H., Kamruzzaman, A. H. M., and Lee, F. H., "Physicochemical and Engineering Behavior of Cement Treated Clays", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No. 7, pp. 696–706, (2004).

18. Lee, F.-H., Lee, Y., Chew, S.-H., and Yong, K.-Y., "Strength and Modulus of Marine Clay-Cement Mixes", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 2, pp. 178–186, (2005).

19. Kitazume, M., and Terash, M., "The deep mixing method. Leiden, the Netherlands", CRC Press/Balkema, Leiden, The Netherlands, (2013).

20. Chen, H., Jiang, Y., Zhang, W., and He, X., "Experimental Study of the Stabilization Effect of Cement on Diesel Contaminated Soil", *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol. 50, No. 2, pp. 199–205, (2017).

21. Estabragh, A. R., Kholoosi, M. M., Ghaziani, F., and Javadi, A. A., "Stabilization and Solidification of a Clay Soil Contaminated with MTBE", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 143, No. 9, pp. 04017054-8, (2017).

22. Estabragh, A.R., Jahani, A., Javadi, A.A., and Babalar, M., "Assessment of Different Agents for Stabilisation of a Clay Soil", *International Journal of Pavement Engineering*, Published online, (2020).

23. Estabragh, A. R., Khajepour, H., Javadi, A. A., and Amini, M., "Effect of Forced Carbonation on the Behaviour of a Magnesia-stabilised Clay Soil", *International Journal of Pavement Engineering*, Published online, (2020).

24. Oluwatuyi, O. E., Ojuri, O. O., and Khoshghalb, A., "Cement-lime Stabilization of Crude Oil Contaminated Kaolin Clay", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 160–167, (2020).

۲۵. جانداری، ف.، ریيسی استبرق، ع.، عبدالهی علی‌بیک، ج.، امینی، م. و انصار شوریجه، آ.، «به‌سازی خاک آلوده به مادهٔ آلی گلیسرول با

منیزیم‌اکسید»، نشریهٔ زمین‌شناسی مهندسی خوارزمی، (پذیرفته‌شده).

26. Yi, Y., Lu, K., Liu, S., and Al-Tabbaa, A., "Property Changes of Reactive Magnesia–Stabilized Soil Subjected to Forced Carbonation", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 53, No. 2, pp. 314–325, (2016).
27. Li, W., Ni, P., and Yi, Y., "Comparison of Reactive Magnesia, Quick Lime, and Ordinary Portland Cement for Stabilization/Solidification of Heavy Metal-Contaminated Soils", *Science of the Total Environment*, Vol. 671, pp. 741–753, (2019).
28. Yang, Y., Ruan, S., Wu, S., Chu, J., Unluer, C., Liu, H., and Cheng, L., "Biocarbonation of Reactive Magnesia for Soil Improvement", *Acta Geotechnica*, Vol. 16, No. 4, pp. 1113–1125, (2021).
29. Wang, F., Xu, J., Zhang, Y., Shen, Z., and Al-Tabbaa, A., "MgO-GGBS Binder–Stabilized/Solidified PAE-Contaminated Soil: Strength and Leachability in Early Stage", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 147, No. 8, pp. 04021059-7, (2021).
30. Shand, M., Al-Tabbaa, A., Qian, J., Mo, L., and Jin, F., "Magnesia Cements: From Formulation to Application", Elsevier, (2020).
31. Wexler, P., Anderson, B.D., Gad, S.C., Hakkinen, P.B., Kamrin, M., De Peyster, A., Locey, B., Pope, C., Mehendale, H.M., and Shugart, L.R., "Encyclopedia of Toxicology", Vol. 3, Academic Press, (2005).
32. López-Vizcaíno, R., Sáez, C., Cañizares, P., and Rodrigo, M. A., "The Use of a Combined Process of Surfactant-Aided Soil Washing and Coagulation for PAH-contaminated Soils Treatment", *Separation and Purification Technology*, Vol. 88, pp. 46–51, (2012).
33. Alcántara, T., Pazos, M., Cameselle, C., and Sanromán, M. A., "Electrochemical Remediation of Phenanthrene from Contaminated Kaolinite", *Environmental Geochemistry and Health*, Vol. 30, No. 2, pp. 89–94, (2008).
34. Chang, M. C., Huang, C. R., and Shu, H. Y., "Effects of Surfactants on Extraction of Phenanthrene in Spiked Sand", *Chemosphere*, Vol. 41, No. 8, pp. 1295–1300, (2000).
35. ASTM D698-12 ε2, "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3))", ASTM International, West Conshohocken, PA, (2012).
36. ASTM D4318-17 ε1, "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils", ASTM International, West Conshohocken, PA, (2017).
37. ASTM D1633-17, "Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders", ASTM International, West Conshohocken, PA, (2017).
38. Yi, Y., Liska, M., Unluer, C., and Al-Tabbaa, A., "Carbonating Magnesia for Soil Stabilization", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 50, No. 8, pp. 899–905, (2013).